

## Přesnost analogově-digitálního převodníku v STM32 mikropočítačích

A. Voborník

Katedra technologií a měření, Fakulta elektrotechnická, ZČU v Plzni,  
Univerzitní 26, Plzeň

E-mail : vobornik@ket.zcu.cz

### Anotace:

Článek analyzuje některé vlastnosti analogově-digitálního převodníku zabudovaného v mikropočítači řady STM32F100. Pozornost je věnována zabudovanému referenčnímu zdroji, snímači teploty čipu, linearitě a šumu převodníku.

This paper analyses some features of an analog to digital converter embedded to STM32F100 microcontrollers. Observation is dedicated to embedded reference voltage, temperature sensor, linearity and noise of converter.

## ÚVOD

Analogově-digitální převodníky (A/D) zabudované v mikropočítačích obvykle mají nízké rozlišení 8 až 10 bitů a nízkou přesnost. Zdrojem chyb je zde rušení od ostatních částí mikropočítače a často také odvození referenčního napětí převodníku od napájecího napětí.

Mikropočítače řady STM32 jsou vybaveny rychlým 12-bitovým převodníkem s výrazně lepšími katalogovými parametry [1]. Vzhledem k uváděným parametrům převodníku se nabízí jeho použití i v přesnějších aplikacích. Pro toto použití by bylo vhodné tyto vlastnosti alespoň částečně ověřit a převodník odzkoušet v typických situacích.

## ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI

A/D převodník je vybaven poměrně komplexním řízením. Přenos dat z převodníku je možno řešit přímým přístupem do registrů, přes přerušovací funkci a DMA přenosem. Umožňuje nadefinovat skupinu max. 4 kanálů (injected channels) vzorkovaných s minimálním časovým odstupem. Periodu měření lze řídit zabudovanými čítači.

Referenční napětí převodníku je v pouzdech do 64 pinů spojeno s napájením převodníku ( $V_{DDA}$ ,  $V_{SSA}$ ) odděleným od napájení ostatních obvodů mikropočítače. U pouzder se 100 pinů a více je referenční napětí připojeno na oddělené piny ( $V_{REF+}$ ,  $V_{REF-}$ ). Napájení převodníku musí být shodné jako napájení ostatních obvodů mikropočítače tj. do  $V_{DDA}$  lze vložit odrušovací filtr a  $V_{SSA}$  spojit se vztažnými svorkami vstupních signálů a omezit tak vliv zemních smyček.

Dále je v obvodu zabudován snímač teploty a referenční zdroj, které jsou připojené na interní vstupy převodníku (ADC1\_IN16, ADC1\_IN17). Výrobce udává v [1] poměrně dobré parametry převodníku, typicky  $\pm 1,5$  LSB pro každý parametr - chyba nuly, rozsahu, integrální a diferenciální linearitě po interní kalibraci.

## REFERENČNÍ ZDROJ

K odstranění závislosti přesnosti měření na napájecím napětí u pouzder do 64 pinů by bylo možno použít zabudovaný referenční zdroj. Při měření vnitřní reference kolísá údaj z převodníku s kolísáním napájecího napětí za předpokladu stabilní úrovně reference. Velikost referenčního napětí je dána vztahem:

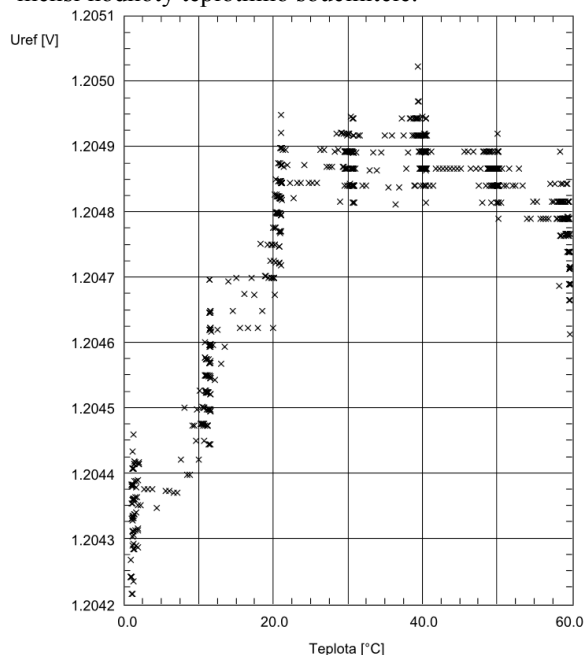
$$U_{ref} = \frac{C_{un}}{C_{max}} * U_n, \quad (1)$$

kde  $C_{un}$  je změřený kód reference,  $C_{max}$  je kód rozsahu převodníku a  $U_n$  je napájecí napětí.

Ze znalosti  $U_{ref}$  je tedy možno určit napájecí napětí a tedy i rozsah měření na ostatních vstupech převodníku. Velikost  $U_{ref}$  je možno změřit tak, že změříme  $C_{un}$  při známém napájecím napětí  $U_n$ .  $C_{un}$  je vhodné určit co nejpřesněji tj. zprůměrováním velkého počtu měření. Velikost reference (asi 1,2V) obvykle bývá citlivá na teplotu a napájecí napětí. V dalších testech byl použit vzorkovací kmitočt 10kHz se vzorkovacím časem 20,8μs, dobou převodu 6,25μs a průměry z 10kSa. Obvod byl napájen ze stabilního zdroje napětí, který byl kontinuálně měřen přesným 6-ti místným multimetrem - měřicí ústřednou Agilent 34970A.

Teplotní závislost byla změřena na obvodech STM32F100CBT6B a STM32F100RBT6B, což jsou čipy lišící se pouze pouzdrem a výrobní šarží. Teplotní závislost má charakter nesymetrické inverzní paraboly se středem přibližně na +35°C, což je příznivý průběh s minimální citlivostí na teplotu v rozsahu 20 až 60°C. Velikost chyby způsobené teplotou je max.  $\pm 0,33$  mV tj.  $\pm 0,028\%$  v teplotním rozsahu 0 až +60°C. V užším teplotním rozsahu 20 až 60°C se tato chyba blíží měřenému šumovému pozadí  $\pm 0,11$  mV. Podle katalogového listu [1] je teplotní součinitel menší než 100ppm/°C. Skutečná hodnota teplotního

součinitele je výrazně menší (21ppm/°C pro 0 až 20°C). U nejnovějších obvodů udává výrobce již menší hodnoty teplotního součinitele.



Obr. 1: Teplotní závislost referenčního napětí

Vliv napájecího napětí je v rozsahu 2,6 až 3,6V menší než  $\pm 0,5\text{mV}$  tj.  $\pm 0,042\%$ . Pro nižší napájecí napětí (2,4 - 2,6V), referenční napětí již výrazně klesá a je tedy nepoužitelné ( $-45\text{mV}$  pro 2,4V). Změřené napětí lze vypočítat ze vztahu:

$$U_x = \frac{C_x}{C_{max}} * U_n, \quad (2)$$

kde  $C_x$  je kód změřeného vstupu.

Do vztahu (2) pro vstupní napětí je možno dosadit za  $U_n$  upravený vztah pro aktuální referenční napětí (1). Vstupní napětí je potom možno vypočítat ze vztahu:

$$U_x = \frac{C_x}{C_r} * U_{ref}, \quad (3)$$

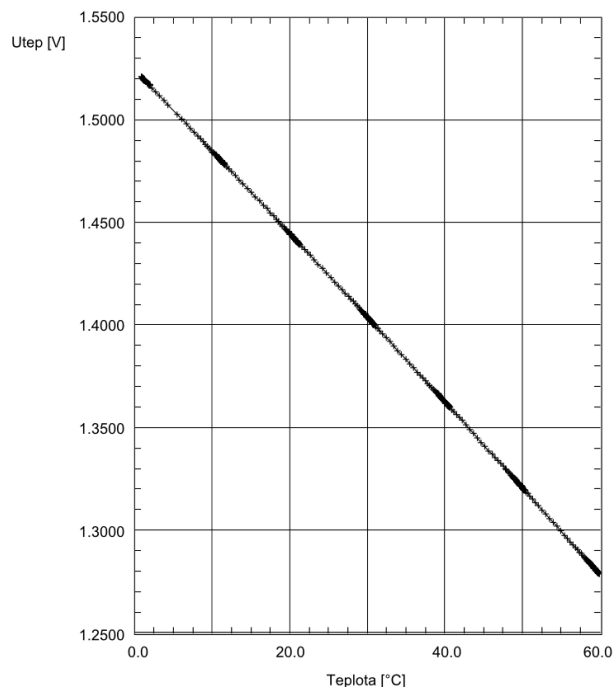
kde  $C_r$  je aktuální kód reference.

$U_{ref}$  je vlastně kusová kalibrační konstanta, která je nezávislá na použitém vstupu, průměrování či filtraci naměřených hodnot.

## SNÍMAČ TEPLOTY

Snímač teploty slouží k měření teploty čipu mikropočítače. Podle [1] má mít citlivost  $4,3\text{mV}/^\circ\text{C}$  a napětí  $1,41\text{V}$  při  $25^\circ\text{C}$ , což přibližně odpovídá dvěma PN přechodům v sérii. Přesnost by měla být asi  $\pm 1^\circ\text{C}$ .

Teplotní závislost byla změřena na stejných obvodech jako v předchozím případě. Závislost je lineární a odpovídá rovnici (4) s chybou  $\pm 0,4^\circ\text{C}$  v teplotním rozsahu 0 až  $60^\circ\text{C}$ , takže snímač s velkou rezervou splňuje katalogovou hodnotu.

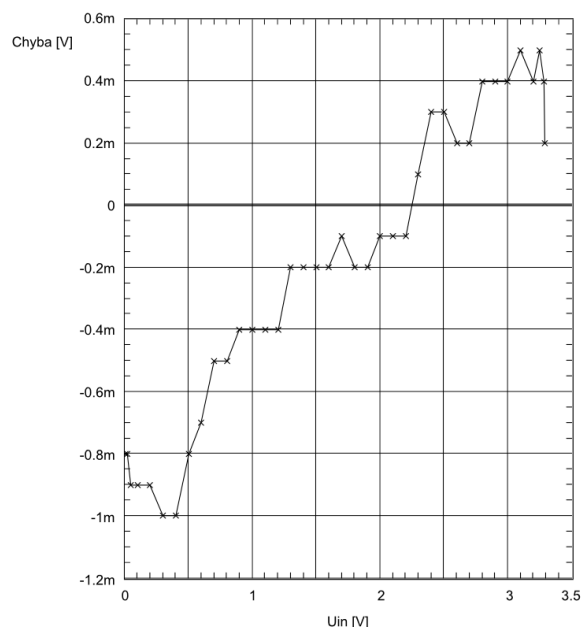


Obr. 2: Teplotní závislost snímače teploty

$$t = 369,6 - \frac{C_t}{C_r} * 291,7, \quad (4)$$

kde  $C_t$  je kód z teplotního čidla a  $C_r$  je aktuální kód reference.

## LINEARITA PŘEVODNÍKU



Obr. 3: Průběh linearity převodníku

Měření bylo provedeno kalibrátorem Fluke 5500A při napájecím napětí  $3,3\text{V}$  a teplotě  $+23^\circ\text{C}$ . Absolutní chyba měření má charakter chyby zesílení a je  $-1$  až  $+0,5\text{mV}$  v rozsahu  $10\text{mV}$  až  $3,29\text{V}$ , což pokrývá relativní chybu z rozsahu  $\pm 0,03\%$ . V případě zúžení měřicího rozsahu na rozsah  $1$  až  $3\text{V}$  se chyba zmenší na  $\pm 0,012\%$ .

V případě nevyužití interní kalibrace převodníku dojde k výrazné ztrátě linearity. Pro vstupní napětí menší než 1,2V převodník udává hodnoty výrazně menší až o -50mV a pro vstupní napětí větší než 1,2V jsou naměřené hodnoty větší až o +80mV. Převodník má tedy přesnost  $\pm 2,4\%$  tj. bez použití interní kalibrace je nepoužitelný.

## ŠUM PŘEVODNÍKU

Vlastní šum převodníku a superponované rušení způsobují kolísání měřené hodnoty a ovlivňují tak použitelnost převodníku zvláště u rychlých měření. Vliv šumu lze do určité míry omezit průměrováním měřených hodnot, tj. lze získat menší kolísání za cenu snížení rychlosti měření. Pro klasické průměrování platí - poloviční kolísání získáme z průměru 4 měření.

Kolísání bylo měřeno v několika režimech s maximální snahou o omezení vnějších rušení. Nejmenší hodnoty kolísání bylo dosaženo po připojení vstupu na poměrně „tvrdý“, ( $R_{AIN} = 210\Omega$ ) teplotně kompenzovaný odporový dělič napájený z  $V_{DDA}$ . Eliminuje se tak vliv kolísání napájecího napětí.

Při tomto zapojení byla změřena závislost kolísání na hodinové frekvenci převodníku, vzorkovacím čase, vlivu vstupního odporu  $R_{AIN}$  a filtrační kapacitě. Hodinová frekvence převodníku  $f_{AD}$  byla nastavována v povoleném rozsahu 1 až 12MHz, přičemž kolísání rostlo s klesajícím kmitočtem. Při  $f_{AD} = 12\text{MHz}$  bylo kolísání 3 LSB a při  $f_{AD} = 1\text{MHz}$  již 4,2 LSB. Vzorkovací čas nastavitelný od 1,5 periody  $f_{AD}$  do 239,5 period  $f_{AD}$  kolísání neovlivňuje. Měřením vlivu  $R_{AIN}$  byla také ověřována platnost rovnice pro  $R_{AIN}$  uvedená v [1] na straně 68. Při zařazení maximálního vstupního odporu splňujícího tuto rovnici dochází k poklesu měřené úrovně o 6 až 10 LSB. Zanedbatelný vliv byl zjištěn pro poloviční hodnotu odporu. Kolísání úrovně je tímto samotným odporem ovlivněno minimálně. Připojením filtračního kondenzátoru přímo ke vstupu dojde k vytvoření dolní propusti 1. řádu. Tato dolní propust sice zmenší kolísání napětí na vstupu, ale vlivem kolísání  $V_{DDA}$  se naměřené kolísání výrazně zvětší. Takže je naprosto nevhodné zařazovat jakoukoli filtraci do vstupu u zdrojů signálu typu dělič napětí. Zároveň byl zkontrolován účinek průměrování - funguje podle předpokladu.

Dále bylo změřeno kolísání vnitřního referenčního zdroje, tj. vlastně kolísání reference + kolísání napájení, které bylo 1,9 LSB při napájení mikropočítače kvalitním stabilizovaným zdrojem Agilent E3640A. Průměrování zde funguje omezeně, neboť se u delších měření začínají projevovat teplotní a i jiné drifts.

Nakonec bylo změřeno kolísání s vnějším zdrojem napětí, přičemž změřená hodnota byla vyhodnocena pomocí rovnice (3). Jako zdroj byl použit kalibrátor Fluke. Kolísání bylo výrazně vyšší 10 LSB bez

průměrování s podobným účinkem průměrování jako při měření referenčního zdroje. Zařazením dolní propusti s mezním kmitočtem 160 Hz se projevil výrazný pokles kolísání (4,3 LSB bez průměrování) pouze u nízkých hodnot průměrování (2 až 8). Pro vyšší hodnoty byl tento pokles již malý. Svědčí to o skutečném kolísání přivedeného napětí do převodníku. Při měření vnějších napětí má vstupní dolní propust smysl.

Tab. 1: Závislost kolísání na počtu měření

Průměry n [-]	Kolísání ADC [LSB]	Kolísání $U_{REF}$ [LSB]	Kolísání $U_X$ [LSB]
1	2,3	1,9	10,1
2	1,8	1,4	7,0
4	1,3	1,06	4,7
8	1,1	0,69	2,6
16	0,71	0,48	1,8
32	0,46	0,3	1,2
64	0,36	0,24	0,88
128	0,27	0,24	0,71
256	0,19	0,14	0,46
512	0,15	0,1	0,42
1024	0,14	0,14	0,51
2048	0,1	0,28	0,40

V každém případě je nutné pro omezení vlivu rušení oddělit napájení  $V_{DDA}$  od ostatních napájecích obvodů filtračním členem. Výrobce povoleno úbytek napětí je 50mV.

Testy byly provedeny na kitu STM32VLDiscovey a na vlastním velmi jednoduchém kitu. Řídící programy byly napsány podle manuálu [2] v jazyce C v archaickém stylu a jsou k dispozici v [3].

## LITERATURA

- [1] Katalogový list STM32F100, CD00251732.pdf, STMicroelectronics, 2012. Dostupné z WWW: <<http://www.st.com/>>.
- [2] Referenční manuál RM0041, CD00246267.pdf, STMicroelectronics, 2011. Dostupné z WWW: <<http://www.st.com/>>.
- [3] Voborník, A. Řídící programy, ZČU, 2012. Dostupné z WWW: <<http://home.zcu.cz/~vobornik/STM32F/>>.